

ANÁLISIS DE CURVAS DE EFICIENCIA DE UN CONCENTRADOR SOLAR PTC EN LA PENÍNSULA DE YUCATÁN

Alberto Jiménez Pech*, Mauricio Alberto Escalante Soberanis

Universidad Autónoma de Yucatán, Av. Industrias No Contaminantes Por Anillo
Periférico Norte S/N Apdo. Postal 150 Cordemex

*Tel (999)985-4282, alberto_jimenez@live.com.mx

RESUMEN

La aplicación de la tecnología del concentrador solar de canal parabólico (PTC) es una manera limpia y novedosa de producir calor de proceso industrial. En este artículo será presentada la evaluación experimental de la eficiencia de primera ley de un concentrador PTC, mientras el ángulo de incidencia de los rayos solares cambia respecto al medio día solar. Se incluye una breve introducción sobre el funcionamiento de los concentradores PTC. La eficiencia será obtenida bajo los estándares de las normas ASHRAE, por medio de un análisis térmico dependiente de la temperatura del fluido de trabajo en la entrada y en la salida del colector. Finalmente será determinada la gráfica característica del colector, al igual que el factor de remoción propio del concentrador solar. Para lograr los puntos anteriores se obtendrá un registro de datos de la temperatura inicial o de entrada del fluido de trabajo en el receptor del colector solar y del ángulo de incidencia del Sol respecto al ángulo acimutal, cuyo eje estará ubicado en el medio día solar. Estos datos serán analizados y se calculará el factor de corrección de ángulo solar, así como la eficiencia óptica, que servirá para hallar la eficiencia instantánea del concentrador solar.

1.-Introducción

Los colectores solares de concentración o concentradores solares utilizan el principio óptico de reflexión o de refracción para concentrar la radiación solar sobre una superficie receptora antes de transformarla en energía térmica.

En un concentrador solar cilíndrico-parabólico (PTC) se aprovecha la radiación directa del Sol. Cuando un concentrador solar PTC está adecuadamente orientado, los rayos solares se reflejan en la superficie parabólica e inciden en una región a lo largo de una línea que corresponde al foco de la sección transversal. En la línea focal se coloca un receptor normalmente cilíndrico y metálico y es allí donde la radiación es absorbida y transformada en energía térmica debido al paso de un fluido de trabajo con propiedades térmicas adecuadas, ya sea agua o algún aceite térmico, y posteriormente dicha energía es utilizada como calor. Dependiendo de la longitud de exposición, el área de captación solar y la radiación, dicho fluido puede calentarse por encima del punto de ebullición del agua, llegando alrededor de 300 °C.

Los colectores cilíndrico-parabólicos se denominan también colectores de alta temperatura. Esto debido a que pueden alcanzar temperaturas superiores a la ebullición, pues son usados de forma industrial en centrales dedicadas exclusivamente a la generación de electricidad mediante la energía solar térmica.

Las pérdidas térmicas de estos sistemas son, por lo general, debidas mayormente a la convección (velocidad del viento) y la radiación emitida de la superficie del absorbedor (temperaturas por arriba de los 300°C). Sin embargo, generalmente se coloca un tubo protector de vidrio que aísla al tubo receptor-absorbedor del ambiente para minimizar los efectos convectivos [1].

En los concentradores solares PTC la construcción de la superficie parabólica es normalmente una lámina de metal pulido con sección parabólica, aunque también se

pueden utilizar segmentos de espejo inclinados. El concentrador debe obtener el máximo posible de radiación solar directa y formar una imagen del Sol en el absorbedor lineal [2].

2.-Metodología Experimental y Condiciones de Trabajo

Se estudió el comportamiento de un concentrador solar PTC ubicado en un punto en la zona norte de la ciudad de Mérida en el estado de Yucatán con coordenadas correspondientes a 21°02'56 Norte y -89°38'37 Oeste. Las especificaciones del colector se encuentran en la Tabla 1.

Tabla 1. Especificaciones ópticas y geométricas del concentrador solar PTC

Longitud del concentrador	240 cm
Ancho de apertura	232.5 cm
Longitud del tubo receptor	224 cm
Reflectividad del concentrador	0.59
Transmitividad del vidrio	0.95
Absortividad del receptor	0.95

El concentrador solar PTC se encontró orientado de Este a Oeste con eje de tracción Norte-Sur. A causa de esta configuración, se realizó un seguimiento de la altura solar, por lo que se llevaron a cabo pruebas con valores de elevación solar de 45°, 30°, 15° por la mañana, 0° y 45°, 30°, 15° por la tarde.

Con el objetivo de poseer las mismas condiciones atmosféricas durante las pruebas para los ángulos antes mencionados, éstas se realizaron mayormente a lo largo de un mismo día manteniendo la temperatura de entrada al sistema constante. Las temperaturas de entrada del fluido de trabajo que se emplearon fueron aproximadas a los valores de 37.2°C, 40°C, 45 y 50°C.

Se utilizó agua como fluido de trabajo, la cual se hizo pasar a través del concentrador solar con un flujo promedio de 0.031221 litros por segundo y a una temperatura de entrada seleccionada de una de las antes mencionadas para cada día de prueba. Se realizaron mediciones cada día de un mínimo de duración de 5 minutos y máximo 10 alrededor de la hora exacta que corresponde a cada ángulo de elevación solar, tal y como dictan las normas ANSI/ASHRAE[3]. Las horas pertenecientes al posicionamiento del sol en cada ángulo de elevación estudiado se muestran en la Tabla 1 y fueron obtenidas por medio del programa NOAA Solar Calculator [4].

Tabla 2. Hora correspondiente a cada ángulo de elevación solar

	Mañana				Tarde		
	45°	30°	15°	0°	15°	30°	45°
Día 1	09:46	10:51	11:56	01:04	14:12	15:17	16:22
Día 2	09:47	10:52	11:57	01:04	14:12	15:17	16:22
Día 3	09:48	10:52	11:57	01:04	14:12	15:17	16:22
Día 4	09:48	10:53	11:58	01:05	14:11	15:16	16:21
Día 5	09:49	10:54	11:59	01:05	14:10	15:15	16:20

3.-Resultados y discusión

Se realizó el cálculo de la eficiencia instantánea η del concentrador por medio de la razón del calor útil \dot{Q} [en W] dividido por el área de apertura A [en m²] y la insolación I [en W/m²], la cual es incidente en dicha apertura.

$$\eta = \frac{\dot{Q}}{AI} \quad (1)$$

El calor útil \dot{Q} está dado por el flujo del fluido de trabajo \dot{m} [en Kg/seg], el calor específico a presión constante c en [KJ/Kg°K], y la temperatura de entrada y la temperatura de salida T_{in} y T_{out} respectivamente [5]:

$$\dot{Q} = mc(T_{out} - T_{in}) \quad (2)$$

La Figura 1 muestra el comportamiento de la eficiencia instantánea obtenida durante las pruebas realizadas. Para el día 1, el agua se introdujo al sistema con una T_{in} igual a la temperatura ambiente que en promedio, para dicho día, fue de 36.31°C. Para el día 2, el agua se introdujo a una temperatura de 40°C; para el día 3, a una temperatura de 45°C y, para el día 4, a una temperatura de 50°C. Las eficiencias mostradas son un promedio de aquéllas obtenidas en cada ángulo θ y se asignó a la hora exacta para poder comparar dicho comportamiento.

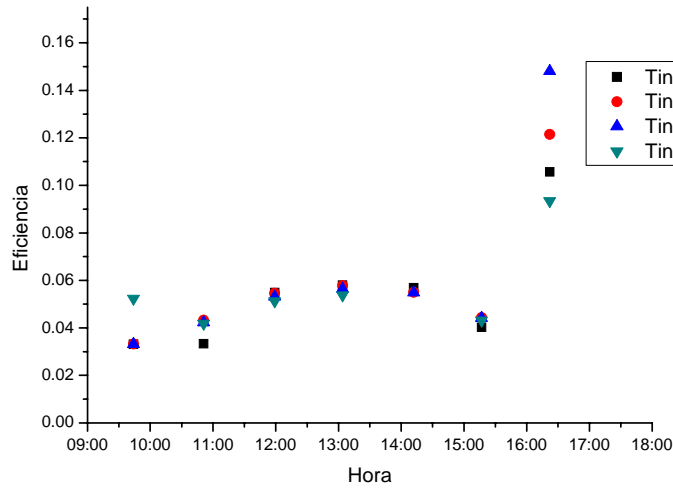


Figura 1. Eficiencia del concentrador solar durante los días de prueba.

Se puede observar que existe un comportamiento similar de la eficiencia en los distintos días de prueba, sin embargo, es importante señalar el comportamiento que se presenta en el ángulo θ igual a 45° por la tarde, ya que ésta tiene un incremento considerable que supera el doble del valor de la eficiencia máxima obtenida en el medio día solar. Debido a este fenómeno, se excluirán de los siguientes procedimientos los cálculos correspondientes a dichas mediciones, ya que si son tomados en cuenta, no se obtienen resultados coherentes,

sin embargo, aún no se puede concluir cuál es la causa de este suceso debido a que se están reportando resultados preliminares en este artículo. Las eficiencias fueron obtenidas con un error promedio del 19.7% en sus valores, esto debido a la incertidumbre que nos proporcionan los instrumentos de medición utilizados.

La Figura 2 nos muestra el comportamiento de la radiación solar directa durante los días de prueba.

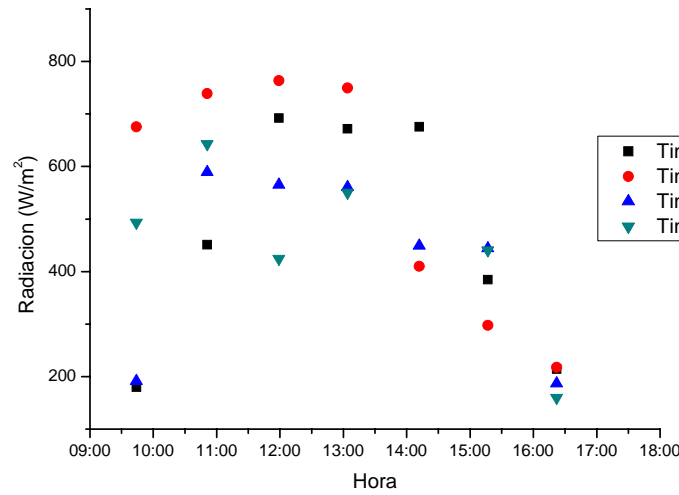


Figura 2. Distribución de la radiación solar directa durante los días de prueba.

La Figuras 3 y 4 muestran las curvas que representan el comportamiento de las eficiencias obtenidas de las pruebas realizadas durante la mañana y durante la tarde para cada ángulo correspondiente a la elevación solar a sus respectivas temperaturas de entrada. La eficiencia se encuentra graficada respecto a la el factor $(T_m - T_{amb})/I$, donde I es la irradiancia, T_{amb} es la temperatura ambiente y T_m es la temperatura media dada por

$$T_m = \frac{(T_{in} + T_{out})}{2} \quad (3)$$

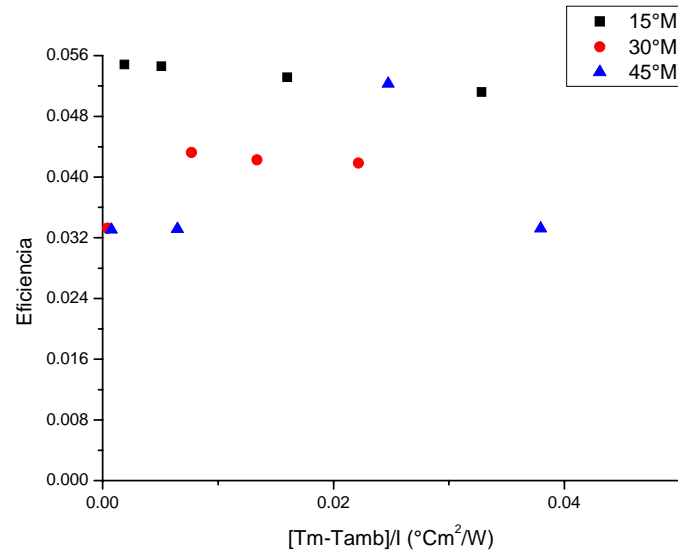


Figura 3. Eficiencias del colector solar por la mañana

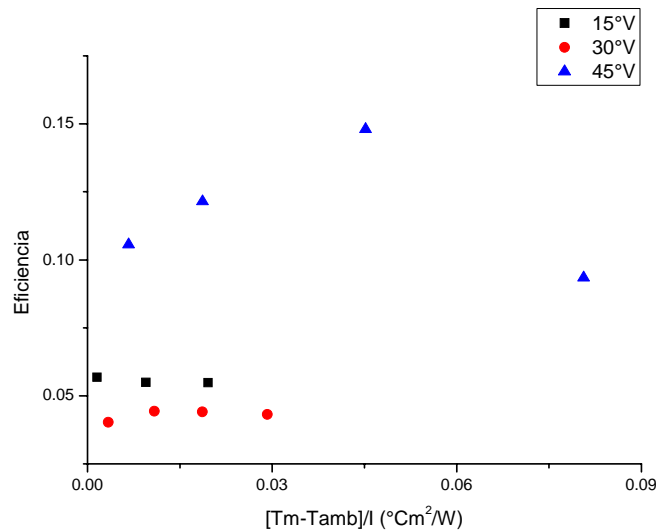


Figura 4. Eficiencias del colector solar por la tarde

Se observa que la eficiencia presenta un comportamiento decreciente mientras la brecha entre la temperatura media y la temperatura ambiente se incrementa, esto en la mayoría de las líneas de eficiencia para cada ángulo de inclinación θ . Se puede notar, con una perspectiva diferente, las eficiencias para el ángulo de inclinación de 45° por la tarde que demostraron un comportamiento extraño respecto a las demás.

Se realizaron los cálculos pertinentes para encontrar el parámetro del colector F_m , el cual representa la transferencia de calor de la superficie del absorbedor al fluido de trabajo. El parámetro F_m también es llamado factor de eficiencia del colector o factor de transferencia de calor y depende de la construcción del colector y no de las condiciones de operación. Dicho factor se encuentra involucrado en el cálculo de la eficiencia de la siguiente manera.

$$\eta = F_m \eta_o - F_m U (T_m - T_{amb}) / I \quad (4)$$

$$\eta_o = \alpha \rho \tau \gamma \quad (5)$$

Donde η_o es la eficiencia óptica del colector y U es el coeficiente de calor perdido por el colector en (4) y α es la absorptividad del receptor, γ es el factor de especulación de radiación reflejada por el colector, ρ es la reflectividad del colector y τ es la transmitividad del vidrio en (5).

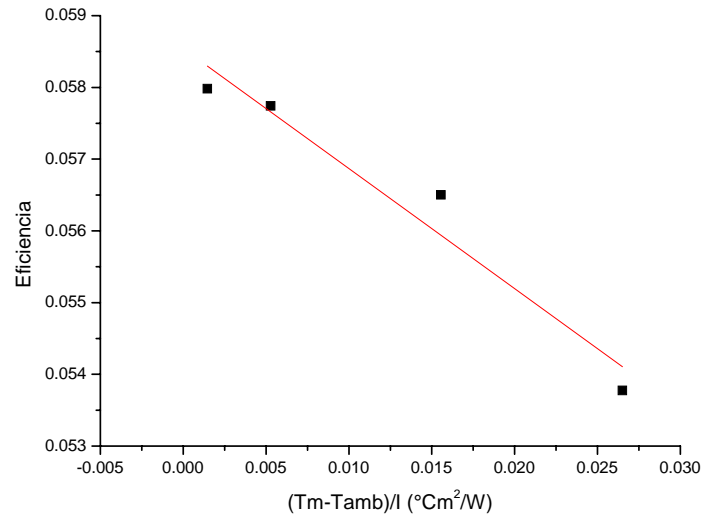


Figura 5. Relación lineal entre la eficiencia y $(T_m - T_{amb})/I$

La Figura 5 nos muestra la relación lineal existente entre la eficiencia y el factor $(T_m - T_{amb})/I$, por lo que con esto se puede deducir los valores de $F_m \eta_o$ y $F_m U$. La regresión lineal, mostrada en (6), fue obtenida a partir de los datos obtenidos a 0° de elevación solar, es decir, en el medio día solar, ya que en este punto, el valor del modificador de ángulo $K(\theta)$ es igual a 1 y se puede ignorar por el momento de (4), sin embargo, éste será hallado a continuación.

$$y = -0.1675x + 0.0585 \quad (6)$$

Al observar la ecuación de la recta (6), se tiene que los valores obtenidos de $F_m \eta_o$ y $F_m U$ son 0.0585 y 0.1675, respectivamente, esto al comparar la ecuación obtenida de la regresión lineal con (4).

Como se mencionó con anterioridad, existe un parámetro más que se involucra en (4) y afecta solamente a la eficiencia óptica del colector, este es el modificador de ángulo de incidencia $K(\theta)$. Éste parámetro se presenta cuando el ángulo de incidencia θ de la radiación solar hacia el colector es distinto de 0° , es decir, cuando se realizan pruebas antes o después del medio día solar.

$$\eta = F_m [\eta_o K(\theta) - U(T_m - T_{amb})/I] \quad (7)$$

Cabe señalar que $K(\theta)$ no incluye la reducción de la insolación debido a $\cos \theta$.

Actualmente ya conocemos los valores de las eficiencias para cada ángulo θ , los valores de los parámetros $F_m \eta_o$ y $F_m U$ y el factor $(T_m - T_{amb})/I$, por lo que es posible ahora calcular los valores de los modificadores de ángulo de incidencia a través de (7). Los valores de los modificadores de ángulos de incidencia se encuentran graficados en la Figura 6.

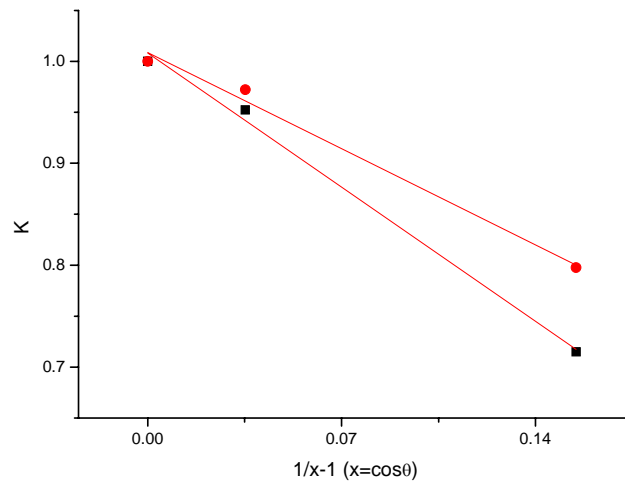


Figura 6. Modificador de ángulo $K(\theta)$ contra el factor $[(1/\cos\theta)-1]$

Se puede notar que, al igual que la eficiencia decrece cuando el factor $(T_m - T_{amb})/I$ se incrementa, el modificador de ángulo $K(\theta)$ decrece cuando el factor $(1/\cos\theta)-1$ se incrementa. Esto es debido a que mientras menor sea la elevación solar, el funcionamiento del colector se verá afectado en gran medida por medio de este factor y la eficiencia decaerá. Finalmente, la gráfica que caracteriza al colector solar se muestra en la Figura 7.

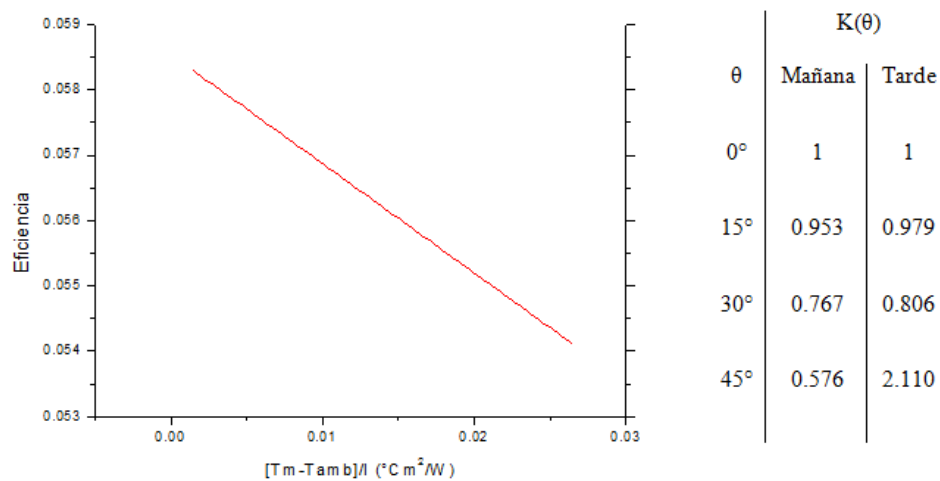


Figura 7. Gráfica del concentrador solar PTC

4.-Conclusiones

La máxima eficiencia obtenida correspondiente al valor de 5.798 ± 1.142 , se encontró en el ángulo θ igual a 0° con temperatura de entrada igual a 37.13°C .

La eficiencia obtenida con los ángulos de incidencia de la radiación de 45° , en horario vespertino, presentaron un comportamiento diferente respecto al esperado por simple inferencia. Sin embargo, no se puede descartar el hecho de analizarlos, por lo que una posible razón que explica este fenómeno es el hecho de que por la tarde, la radiación solar ilumina en mayor medida al receptor en la zona de entrada del agua que en la de salida, por lo que en este punto, el receptor transfiere una gran cantidad de calor al fluido que al recorrer el camino de receptor hacia la zona de salida aumenta considerablemente el ΔT y por consiguiente se incrementa la eficiencia.

Los parámetros $F_m\eta_o$ y F_mU que caracterizan a este concentrador solar poseen los valores de 0.0585 y 0.1675 respectivamente. No es posible determinar el valor exacto de la eficiencia óptica η_o , debido a que no se conoce el valor de γ , que se encuentra directamente involucrada y representa la fracción de especulación de radiación reflejada del colector.

Los modificadores de ángulo de incidencia $K(\theta)$ presentan valores ligeramente mayores para ángulos θ ubicados en la tarde que para los ubicados en la mañana y se pueden observar en la Figura 7.

5.-Agradecimientos

Al Laboratorio de Energía de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán. A Sergio Canché Pacab y José Quijano Domínguez, por el apoyo técnico otorgado durante la realización del presente trabajo.

6.-Referencias

- [1] A. Rabl, *Active Solar Collectors And Their Applications*, 83, Center for Energy and Environmental Studies. Princeton University, Oxford University Press, (1985).
- [2] A. Duffie John, A. Beckman William, *Solar Engineering of Thermal Processes*, Editorial John Wiley & Sons, Inc.
- [3] *ANSI/ASHRAE STANDARD 93-1986*.
- [4] *NOAA Solar Calculator, Find Sunrise, Sunset, Solar Noon and Solar Position for Any Place on Earth*, <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/solcalc/>
- [5] D. Yogi Goswami, K. Frank, F. Kreider Jan, *Principles of Solar Engineering*, 13, Editorial Taylor & Francis, (1999).
- [6] L. Vidriales Escobar, *Colector de cana parabólico para la generación directa de vapor para calor de proceso*, Universidad Autónoma de México, (2007).
- [7] E. Venegas Reyes, *Sistema para generación y almacenamiento de calor de proceso mediante un concentrador solar de foco puntual (COSPAA-90)*, Universidad Autónoma de México, (2008).